

Multicriteria design of passive harmonic filters for industrial installations using evolutionary computation techniques

*Jandecy Cabral Leite¹; Ignácio Perez Abril²; Manoel Socorro Santos Azevedo¹, Manoel Henrique Reis do Nascimento¹, Nadime Mustafa Moraes³, Ana Maria Reis³

¹*Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM)*

²*Universidad Central de Las Villas (UCLV)*

³*Universidade do Estado do Amazonas (UEA)*

*jandecy.cabral@itegam.org.br, iperez@uclv.edu.cu, manoelazevedo@yahoo.com.br, mustafanadime@gmail.com, areisreis@gmail.com, hreys@bol.com.br

ABSTRACT

For analysis of industrial growth and in particular the Industrial Pole of Manaus (PIM), need to get mathematical tools that facilitate the specialist to make decisions about the selection and sizing of harmonic filters that provide neutralize the harmful effects of harmonics generated by nonlinear loads industry and achieve compliance with the standards of the relevant power quality standards. The article aims to develop a mathematical method and a computer tool (Evolutionary Computation - NSGA II) for the selection of configuration parameters and design a set of passive harmonic filters for industrial electrical systems. The methodology was discussed the optimization problem of harmonic compensation through passive filters was formulated as a multiobjective problem that considers both the goals of reducing harmonic distortion as the economic effectiveness of the project considering the characteristics of the Brazilian rates. The results show from the analysis of several practical examples show the advantages of the method developed so that the developed computational tool has several new features like: not only calculates the parameters that characterize the filters, as well as select the type of configuration and the number of filter branches in each candidate bar according to a set of pre-established configurations; They have implemented two standards for the evaluation of power quality restrictions (PRODIST-Module 8 v.6 2015 and IEEE 519-92).

Keywords: Evolutionary Computation, Harmonic Impact, Quality Electric Power and Distribution of Electric Power.

Projeto multicritério de filtros harmônicos passivos para instalações industriais utilizando técnicas de computação evolucionária

RESUMO

Para análise do crescimento industrial e em especial, o Pólo Industrial de Manaus (PIM), são necessários obter ferramentas matemáticas que facilitem ao especialista tomar decisões sobre a seleção e dimensionamento dos filtros harmônicos que proporcionam neutralizar os efeitos prejudiciais dos harmônicos gerados pelas cargas não lineares da indústria e alcançar conformidade com os padrões das normas de qualidade de energia correspondentes. O objetivo artigo é desenvolver um método matemático e uma ferramenta computacional (Computação Evolucionária – NSGA II) para a seleção da configuração e parâmetros do projeto de um conjunto de filtros harmônicos passivos para sistemas elétricos industriais. Como metodologia foi abordado o problema de otimização da compensação de harmônicos por meio de filtros passivos foi formulado como um problema multiobjetivo que considera tanto os objetivos da redução da distorção harmônica como da efetividade econômica do projeto considerando as características das tarifas brasileiras. Os resultados mostram a partir da análise de vários exemplos práticos, mostram as vantagens do método desenvolvido tanto que a ferramenta computacional desenvolvida tem várias novidades como: não só calcula os parâmetros que caracterizam os filtros, como também seleciona o tipo de configuração e o número de ramos do filtro em cada barra candidata de acordo com um conjunto de configurações pré-estabelecidas; têm implementada duas normas para a avaliação das restrições de qualidade de energia (PRODIST- Módulo 8 v.6 2015 e IEEE 519-92).

Palavras-Chave: Computação Evolucionária, Impactos Harmônicos, Qualidade de Energia Elétrica e Distribuição de Energia Elétrica.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos modernos contêm uma grande quantidade de fontes contaminantes ou produtores de

harmônicos onde se destacam fundamentalmente as cargas não lineares empregadas nas indústrias, nas instalações comerciais e residenciais [1][2].

As fontes contaminantes de média e alta potência geralmente se concentram nos sistemas elétricos industriais. Entre estas se incluem conversores estáticos de potência e fornos de arco elétrico.

Em instalações comerciais e residenciais, são empregadas uma grande quantidade de cargas não lineares de pequena potência, que devido a seu grande número não podem ser desprezadas, como fonte de distorção. Este é o caso de equipamentos eletrodomésticos e de escritório, lâmpadas de descarga, entre outros.

Os harmônicos injetados no sistema elétrico pelas cargas não lineares produzem efeitos: nos próprios sistemas elétricos de potência e nas cargas elétricas conectadas a estes, assim como nos sistemas de comunicações.

Todos os efeitos dos harmônicos em sistemas de potência são prejudiciais e entre eles pode-se citar: 1) A possível existência de ressonâncias série e paralelo, que contribuem para a amplificação dos harmônicos e seus efeitos; 2) Redução da eficiência do sistema, aumentando as perdas nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia; 3) O envelhecimento prematuro do isolamento dos componentes da rede elétrica e, conseqüentemente, redução da sua vida útil e 4) O mau funcionamento do sistema ou quaisquer de seus componentes.

Um dos fenômenos mais prejudiciais associados com a presença dos harmônicos é a possibilidade de ocorrência de ressonância no circuito elétrico. Como a maioria dos elementos existentes nos sistemas de potência como: transformadores, máquinas rotativas, etc. têm caráter indutivo, a presença de bancos de capacitores para compensar o fator de potência ou o próprio efeito capacitivo das linhas de potência pode interagir com os elementos indutivos do circuito de forma que a determinadas frequências são iguais às reatâncias indutivas e capacitivas equivalentes causando uma condição de ressonância em que podem aparecer altos valores de tensão e de corrente, que afetam o funcionamento correto do sistema e podem causar falhas nos equipamentos.

Os filtros harmônicos são dispositivos ativos ou passivos, cuja missão é de evitar a circulação dos harmônicos pelo sistema elétrico de potência para impedir a ocorrência de ressonâncias prejudiciais e evitar outros efeitos indesejáveis que podem ocorrer. Apesar dos filtros ativos terem características de desempenho melhores que os passivos, estes últimos ainda são mais usados que os primeiros. É preciso ter ferramentas matemáticas que facilitem ao especialista tomar decisões sobre a seleção e dimensionamento dos filtros harmônicos necessários para neutralizar os efeitos prejudiciais dos harmônicos gerados pelas cargas não lineares da indústria e alcançar conformidade com os padrões das normas de qualidade da energia correspondentes.

Além disso, como os filtros harmônicos passivos têm a capacidade de filtragem e também de gerar potência reativa à rede, estes meios são eficazes compensadores de potência reativa e, portanto, podem conseguir uma economia significativa no faturamento de energia elétrica consumida por essas instalações industriais.

II. NORMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA

As normas de qualidade de energia compreendem um conjunto de regulações que estabelecem os limites de qualidade que o sistema elétrico deve cumprir para oferecer um bom serviço elétrico aos consumidores.

Existem normas internacionais e nacionais para o controle da distorção das formas de onda de tensão e corrente. Entre as primeiras destacam-se: a [3][4][5].

Vale ressaltar que a estrita observância dos limites recomendados pelas normas não necessariamente eliminam os problemas, particularmente quando os sistemas estão operando perto dos limites [6].

II.1 NORMA IEC 61000-3-6 DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

A série 61000 da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) compreende um amplo conjunto de regulações sobre a qualidade de energia. Em particular, a [4] estabelece os limites de emissão de harmônicos para as instalações conectadas a sistemas elétricos de potência. Para a tensão elétrica esta norma define:

1) A Distorção Harmônica Total de Tensão (%THDV). Calculada como a relação entre a tensão *rms* dos harmônicos superiores considerados e a tensão fundamental (V_1), apresentado em (1).

$$\%THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (1)$$

2) A Distorção Harmônica Individual de tensão de ordem *h* (%IHDV_h). Calculada como a relação entre a tensão de um harmônico individual (V_h) e a tensão fundamental de acordo com (2).

$$\%IHDV_h = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (2)$$

A referência (IEC/TR 61000-3-6, 2008) estabelece dois tipos de limites: (1) níveis de compatibilidade como é mostrado na Tabela 1 e (2) níveis de planejamento, como apresentado na Tabela 2. Quando as emissões de harmônicos das cargas não lineares não superam os níveis de compatibilidade estabelecidos, assegura-se uma boa qualidade de energia. Por outro lado, os níveis de planejamento (mais restritivos que os de compatibilidade) são seguidos como guias para o planejamento do sistema e os mesmos asseguram o cumprimento dos níveis de compatibilidade.

Tabela 1 – Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa (BT) e média tensão (MT).

Ímpares não múltiplas de 3		Ímpares múltiplas de 3		Pares	
Ordem de Harmônico <i>h</i>	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico <i>h</i>	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico <i>h</i>	Tensão Harmônica %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27(17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25(10/h) + 0.25$

Fonte: (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

Os limites de harmônicos de tensão são estabelecidos para evitar os efeitos nocivos dos harmônicos em regime permanente e em curto prazo que se define como:

1) Efeitos de regime permanente são relacionados fundamentalmente a efeitos térmicos em capacitores, cabos,

transformadores, motores e outros, e são medidos em média a intervalo de 10 minutos.

2) Efeitos a curto prazo que se manifestam em equipamentos eletrônicos sensíveis a níveis de harmônicos tendo como intervalo de interesse para registro a faixa de 3 segundos ou menos.

O nível de compatibilidade do THDV para média e baixa tensão é de 8% para harmônicos de regime permanente (intervalos de 10 minutos) e de 11% para harmônicos de curta duração (intervalos menores que 3 segundos).

Os limites de compatibilidade da Tabela 1 e de planejamento da Tabela 2 para as tensões harmônicas individuais são válidos para harmônicos estacionários. Estes limites devem ser modificados pelo fator K_{hvs} para ser utilizados com harmônicos de curta duração conforme (3).

$$K_{hvs} = 1.3 + 0.7 \frac{h-5}{45} \quad (3)$$

Tabela 2 – Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra-alta tensão (EHT).

Ordem de Harmônico h	Ímpares não múltiplas de 3		Ímpares múltiplas de 3		Pares			
	Tensão Harmônica h %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %		
	MT	AT-EHT				MT	AT-EHT	MT
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
$17 \leq h \leq 49$	$1.9(17/h)-0.2$	$1.2(17/h)$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25(10/h)+0.22$	$0.19(10/h)+0.16$

Fonte: (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

Esta norma não estabelece explicitamente limites para a distorção da corrente no PCC, no entanto, a mesma contempla a possibilidade de converter os limites de distorção para a tensão em limites de distorção para a corrente ao utilizar a impedância em frequências harmônicas do sistema externo de energia.

II.2 NORMA IEEE Std. 519 – 92.

Essa norma é chamada de "práticas recomendadas e requisitos da norma [3] para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência". É caracterizada por estabelecer os limites para ambos, não só a distorção da tensão fornecida pelo distribuidor, como também a corrente de carga do consumidor [3].

Limites de harmônicas da norma [3] foram estabelecidas para o PCC (Figura 1) entre a concessionária e vários consumidores. Assim, este é o ponto em que outros consumidores podem ser alimentados.

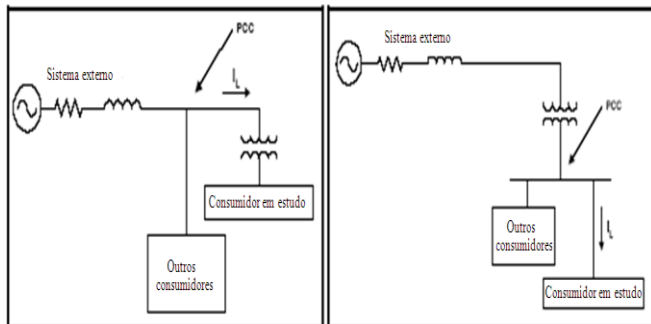


Figura 1: Ponto de conexão comum (PCC).

Do ponto de vista da distorção da tensão, a concessionária é responsável por manter a qualidade da forma de onda de tensão no PCC, abaixo dos limites máximos de regime permanente apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Limites de distorção de tensão

Tensão No PCC	Distorção Individual de Tensão (%)	Distorção Total de Tensão THDV (%)
$V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

Fonte: IEEE Std. 519-92.

Estes limites devem ser cumpridos para a pior condição de operação do sistema com duração mais de uma hora. Para períodos de curto prazo, durante as condições iniciais ou transitórias, esses limites podem ser ultrapassados em 50%. Os limites de distorção de corrente especificados na Tabela 4, dependem da relação que existe entre a carga do consumidor (I_L) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}) no PCC. Um elevado I_{sc}/I_L significa que o sistema tem uma maior imunidade para absorver as emissões de harmônicas da carga e dessa forma pode admitir níveis de distorção harmônicos mais elevados. Os limites de correntes harmônicas são estabelecidos pelos indicadores apresentados a seguir:

1) A distorção da demanda total (%TDD), calculada como a razão entre a corrente rms de harmônicos mais elevados considerados e a corrente de carga máxima conforme equação (4).

$$\%TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} 100 \quad (4)$$

2) Distorção harmônica individual da demanda ($IDD_h\%$), calculada como a relação entre a corrente de um harmônico individual (I_h) e a corrente de carga máxima de acordo com equação (5).

$$\%IDD_h = \frac{I_h}{I_L} 100 \quad (5)$$

Tabela 4: Limites de distorção da corrente no PCC.

V ≤ 69 kV						
I _{sc} /I _L	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69 kV < V ≤ 161 kV						
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
V > 161 kV						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Fonte: [3].

II.3 ANEEL - PRODIST - MÓDULO 8 V.6 2015 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O objetivo desta norma é estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE.

Tabela 5: Terminologia

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT _h %
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Tensão harmônica de ordem h	V _h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	hmáx
Ordem harmônica mínima	hmin
Tensão fundamental medida	V ₁

Fonte: [5].

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na Tabela 6. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulamentariamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Tabela 6: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção harmônica total de tensão DTT(%)
V _n ≤ 1 kV	10
1 kV < V _n ≤ 13.8 kV	8
13.8 kV < V _n ≤ 69 kV	6
69 kV < V _n ≤ 230 kV	3

Fonte: [5].

A Tabela 5 sintetiza a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas. As expressões para o cálculo das grandezas %DIT_h e DTT% são iguais as já previamente definidas pelas normas [4] e [3] para o %IHD_h e o %THD_h respectivamente.

Tabela 7: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).

Harmônicos	Ordem	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
		V _n ≤ 1 kV	1 kV < V _n ≤ 13.8 kV	13.8 kV < V _n ≤ 69 kV	69 kV < V _n ≤ 230 kV
Ímpares não múltiplos de 3	5	7.5	6	4.5	2.5
	7	6.5	5	4	2
	11	4.5	3.5	3	1.5
	13	4	3	3	1.5
	17	2.5	2	1.5	1
	19	2	1.5	1.5	1
	23	2	1.5	1.5	1
	25	2	1.5	1.5	1
	>25	1.5	1	1	0.5
Ímpares múltiplos de 3	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
Pares	2	2.5	2	1.5	1
	4	1.5	1	1	0.5
	6	1	0.5	0.5	0.5
	8	1	0.5	0.5	0.5
	10	1	0.5	0.5	0.5
	12	1	0.5	0.5	0.5
	>12	1	0.5	0.5	0.5

Fonte: [3].

II.3.1 APLICAÇÃO DO PRODIST

Os sinais a serem monitorados devem utilizar sistemas de medição cujas informações coletadas possam ser processadas por meio de recurso computacional. A duração do monitoramento deve ser de pelo menos uma semana com registro a cada 10 minutos.

Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

Os instrumentos de medição devem observar o atendimento aos protocolos de medição e às normas técnicas vigentes.

O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{max} = 25$).

Os transformadores de potencial utilizados em um sistema trifásico devem ter as mesmas especificações e suas cargas devem corresponder a impedâncias semelhantes, e serem conectadas em Y-Y aterrado, independentemente do tipo ou classe de tensão. Para os casos sem conexão a terra pode ser utilizada como arranjos para os transformadores de potencial do tipo V.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

O problema formulado para o projeto de filtros é não linear com variáveis reais e inteiras cuja solução requer um algoritmo de otimização multiobjetivo misto. Estes tipos de problemas de otimização apresentam várias funções objetivos, que quase sempre estão em conflito, e que se pretende otimizar simultaneamente [7].

III.1 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Em otimização multiobjetivo a noção de solução ótima é substituída pela noção de solução não dominada ou ótima de Pareto. Uma solução não dominada é uma solução admissível para a qual não é possível melhorar simultaneamente todas as funções objetivo; i.e., a melhoria numa função objetivo apenas pode ser alcançada por degradação de pelo menos uma das outras. Ou seja, uma solução admissível é dominada por outra sempre que ao passar da primeira para a segunda, exista melhoria de pelo menos uma função objetivo, permanecendo inalteradas as restantes [8].

Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II). [9] desenvolveram um algoritmo, NSGA-II, que usa um mecanismo de preservação e diversificação de soluções. Depois identifica várias frentes não dominadas, classificando a população em diferentes níveis de dominância. Existem muitos conceitos e definições particulares em otimização multiobjetivo. Como trabalha com problemas em que os objetivos encontram-se em conflito, não é possível obter uma solução ótima, mas um conjunto de soluções que constituem a frente ótima de Pareto. Nestas circunstâncias, ter como solução do problema um conjunto de soluções “ótimas” pode ser entendido no sentido de não se poder afirmar que, nesse conjunto, uma solução é melhor do que outra (i.e., o conceito de não dominância é o conceito chave em otimização multiobjetivo, mas é um conceito “pobre” no sentido em

que não permite discriminação entre essas soluções) [7][9][10].

O algoritmo tem início na iteração ($t = 0$) com a geração aleatória de uma população P_0 , de tamanho N . Nessa população são identificadas várias frentes não dominadas, classificando as soluções em diferentes níveis de não dominância “rank”. A cada solução é atribuído um valor de aptidão igual ao seu nível de dominância, começando por 1 para as soluções da primeira frente (que são as soluções não dominadas da população). Este procedimento é conhecido como ordenamento não dominado “non-dominated sorting”.

Depois desta fase de inicialização do algoritmo, inicia-se uma fase comum a todas as gerações (iterações) que compreende os seguintes passos pela iteração t :

1) Aplica-se um mecanismo de seleção por torneio, baseado no valor da aptidão e da distância de multidões de forma a preservar a diversidade da população. A solução i ganha o torneio se: tiver melhor classificação (em termos de ordenação nas frentes não dominadas) do que a solução j , ou se tiver a mesma classificação e a solução i tiver uma distância de multidões superior à solução j . A distância de multidões é usada como uma estimativa da densidade de soluções na vizinhança de uma solução i ;

2) São aplicados os operadores genéticos cruzamento e mutação, para construir uma população de descendentes, Q_t , de tamanho N que é combinada com a população P_t para formar uma terceira população R_t composta dos progenitores e descendentes;

3) As soluções da população R_t resultante (com tamanho $2N$), são classificadas por níveis de dominância para identificação das diferentes frentes não dominadas, e;

4) É feita uma nova população, P_{t+1} , a partir das soluções da população R_t (ver Figura 2). Como o tamanho de P_{t+1} é metade da de R_t , nem todas as frentes podem ser adicionadas à nova população. Isto implica que as piores frentes sejam ignoradas e que, ao adicionar a última frente possível à nova população, o número de soluções seja maior do que o espaço que sobra em P_{t+1} . Não havendo possibilidade de adicionar a totalidade de soluções da última frente possível, quando esta frente é adicionada, em vez de simplesmente se ignorar os elementos excedentes, é usada uma estratégia baseada em distância de multidões.

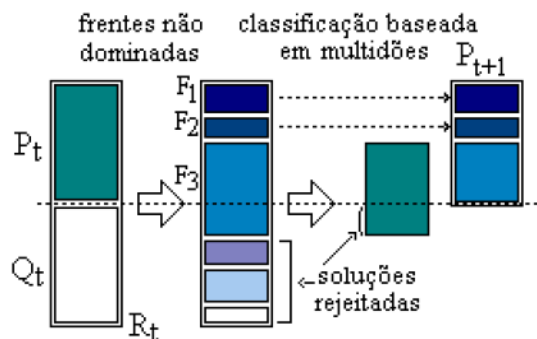


Figura 2: Obtenção da população P_{t+1} .

Fonte: [7].

5) Se a iteração corrente é menor do que o número pré-definido de gerações é incrementado $t = t + 1$ e se volta ao passo 1, mais em caso contrário o algoritmo termina.

Sheshadri [11] lançou o código fonte em Matlab para NSGA-II que é utilizado no desenvolvimento do *software*

de otimização deste artigo. Algumas características desta implementação do NSGA-II são as seguintes:

1) O algoritmo fica codificado diretamente em números reais “real-coded GA”, assim, o cromossomo fica representado por um arranjo de números reais, e;

2) O operador genético cruzamento emprega a técnica do “Simultated Binary Crossover SBX”, a qual simula o cruzamento binário que existe na natureza. O cruzamento do elemento j de dois progenitores p_{1j} e p_{2j} é feito mediante o seguinte procedimento:

- a. Gera-se um numero aleatório u_j uniformemente distribuído entre 0 e 1.
- b. Calcula-se o coeficiente β_j , mediante (6).

$$\beta_j = \begin{cases} (2u_j)^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j \leq \frac{1}{2} \\ (1/(2-2u_j))^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (6)$$

onde μ é o índice de cruzamento selecionado ($\mu=20$) segundo [11].

- c. Calcula-se os elementos j dos filhos c_{1j} e c_{2j} mediante (5.23).
- d.

$$\begin{aligned} c_{1j} &= \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{2j} \\ c_{2j} &= \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{2j} \end{aligned} \quad (7)$$

3) O operador genético mutação segue uma técnica tal como o cruzamento. A mutação do elemento j do progenitor p_j é feita mediante o seguinte procedimento:

- a. Gera-se um número aleatório r_j uniformemente distribuído entre 0 e 1.
- b. Calcula-se o coeficiente δ_j , mediante (5.24).

$$\delta_j = \begin{cases} (2r_j)^{\frac{1}{\mu m+1}} - 1 & \text{se } r_j < \frac{1}{2} \\ 1 - (1/(2-2r_j))^{\frac{1}{\mu m+1}} & \text{se } r_j \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

onde μm é o índice de mutação selecionado ($\mu m=20$) [11].

- c. Calcula-se o elemento j do filho c_j mediante (9).

$$c_j = p_j + (x \max_j - x \min_j) \delta_j \quad (9)$$

onde $x \max_j$ e $x \min_j$ são os limites superior e inferior para a variável representada na posição j do cromossomo.

4) O algoritmo não tem um critério de convergência especial, mais termina quando se completa o número estabelecido de gerações.

Para poder utilizar o código de Sheshadri, foi necessário desenvolver algumas modificações que são descritas seguidamente [11]:

1) Depois que o operador genético de cruzamento é feito, os resultados c_{1j} e c_{2j} dos elementos j que são números inteiros são aproximados ao valor inteiro mais próximo.

2) Depois que o operador genético de mutação é feito, os resultados c_j dos elementos j que são números inteiros são aproximados ao valor inteiro mais próximo. Se o resultado $c_j < x \min_j$, é avaliado $c_j = x \max_j$, pelo contrário, se o resultado $c_j > x \max_j$, é avaliado $c_j = x \min_j$.

3) Além disso, os limites $x \min_j$ e $x \max_j$ são considerados na obtenção das soluções viáveis.

III.2 AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO

Como todo algoritmo genético, o NSGA-II utiliza uma função para avaliar os quatro objetivos declarados f_1 , f_2 , f_3 e f_4 a partir do arranjo x de variáveis independentes do problema (cromossomo). Esta função foi desenvolvida no Matlab como mostra (10):

$$\text{function } [f, data] = \text{evaluate_objectives}(x, data) \quad (10)$$

onde o parâmetro $data$ representa todos os dados adicionais para avaliar a operação do sistema para uma determinada solução (cromossomo x), e f recebe os resultados das funções objetivo calculadas.

O algoritmo da função “evaluate_objectives” é mostrado na Figura 3, e executado como descrito a seguir:

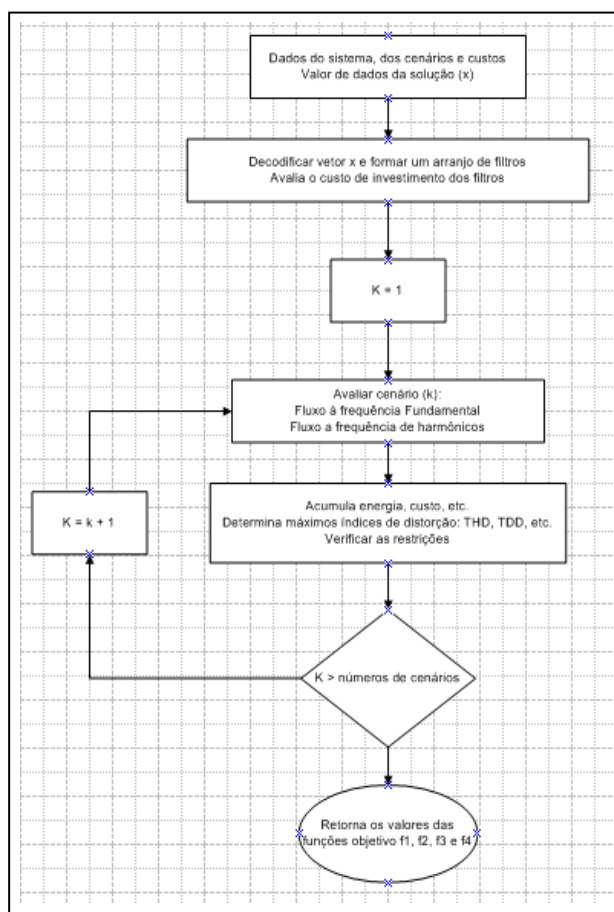


Figura 3. Algoritmo da função “evaluate_objectives”.

1) Dado o arranjo X de solução (cromossomo), determinar os dados correspondentes ao conjunto de filtros a serem localizados no sistema industrial;

2) Calcular o custo de investimento dos filtros;

3) Para todos os W cenários possíveis, analisar a operação do sistema elétrico industrial, por meio da função “loadflow” (fluxo de potência na frequência fundamental) e da função “harmflow” (cálculo da penetração de harmônicos);

4) Com os resultados calculados para os L cenários característicos, calcular a fatura de energia elétrica, incluindo as perdas em todos os elementos e nos filtros. Com esses dados, avalia-se o -VPL do projeto de compensação (f_1);

5) Calcular as taxas de distorção de tensões e correntes para todos cenários possíveis e determinar os máximos valores de TDD e THD (f_2 e f_3 , respectivamente), e;

6) Verificar as restrições de qualidade da energia e a saturação dos capacitores e calcular a função de restrições (f_4).

III.3 ALGORITMO PRINCIPAL

O algoritmo principal de otimização representado na Figura 4, pode ser resumido como:

- 1) Analisar o caso base do sistema industrial (avalia o custo inicial e todas as taxas de harmônicos);
- 2) Obter as soluções ótimas de Pareto mediante o algoritmo NSGA-II;
- 3) Selecionar uma solução da população final do NSGA-II.

A otimização é realizada a partir da área de trabalho do Matlab, invocando a função desenvolvida *nsga2opt.m* com a seguinte sintaxe:

```
function nsga2opt(@filename, popsize, generations) (11)
```

onde *filename* é o nome do arquivo (*.m) que descreve os dados do problema a otimizar, *popsize* é o tamanho da população e *generations* é a quantidade de gerações a avaliar.

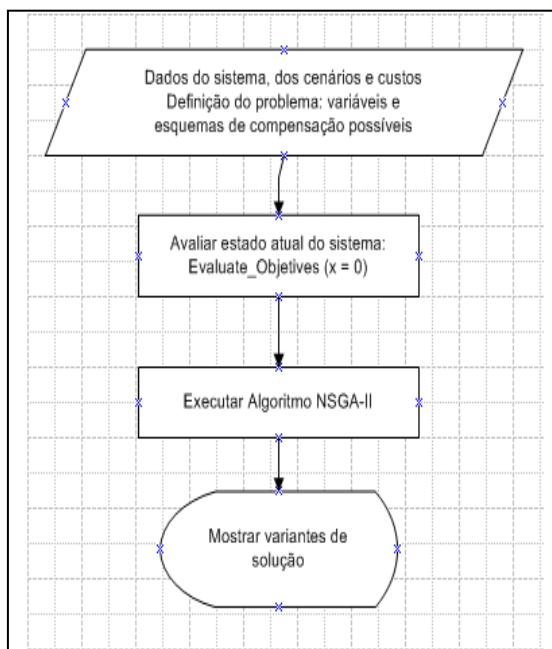


Figura 4: Algoritmo principal

Em cada geração, o algoritmo imprime os valores mínimos de cada função objetivo e parâmetros adicionais. Além disso, a cada dez gerações salva um arquivo (*results##.mat*) que contém todos os resultados da atual geração. Obtido o arquivo de resultados para o número de gerações especificadas, este é examinado pela função desenvolvida *dispresults.m* que tem a seguinte sintaxe:

```
function dispresults(resultfile) (12)
```

onde *resultfile* é o arquivo *result##.mat* da última das gerações.

A função *dispresults* mostra os resultados obtidos e seleciona as variantes a serem utilizadas de acordo com o seguinte algoritmo:

- 1) São selecionadas as variantes possíveis ($f_4 = 0$) da população final;
- 2) Dessas variantes, obtêm-se as soluções viáveis;
- 3) O resultado é apresentado graficamente (funções objetivo) para as diferentes variantes ordenadas, e;
- 4) A opção desejada é escolhida.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este exemplo corresponde a uma indústria que contém cargas de média e baixa tensão. O sistema elétrico utiliza uma rede de distribuição primária de 4160V que alimenta as cargas de média tensão e quatro subestações que alimentam as cargas de 480V. As cargas não lineares se concentram na parte de baixa tensão e estão formadas por conversores trifásicos de seis pulsos.

Neste caso considera-se que a tensão de todos os nós da rede deve cumprir com os indicadores de qualidade conforme estabelece a norma PRODIST-Módulo 8 da ANEEL. A instalação industrial está descrita de acordo com o diagrama unifilar mostrado na Figura 5 [12].

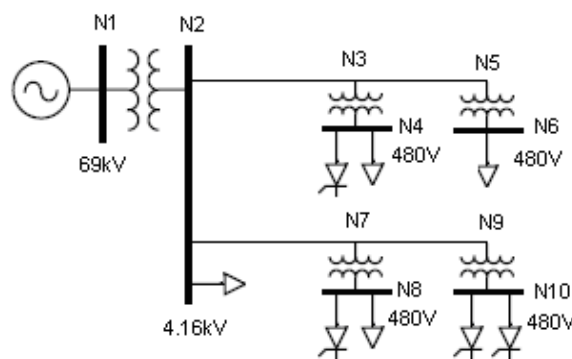


Figura 5: Exemplo de um Sistema.

Os dados que descrevem a instalação industrial. Para o processo de otimização, são considerados cinco cenários de operação possíveis, os quais são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Cenários para as análises

Parâmetro	Cenários				
	1	2	3	4	5
Duração diária do cenário (h/dia)	6	10	8	0	0
Depreciação da capacitância dos filtros ΔC(%)	0	0	0	0	10
Depreciação da indutância dos filtros ΔL(%)	0	0	0	-5	5
MVA de curto-circuito no PCC (MVA)	250	250	250	125	125

De acordo com o [5], estes níveis de distorção estão dentro dos limites estabelecidos. Terminadas 100 gerações, o algoritmo genético produziu uma população de 500 soluções, para o exemplo. Extraindo apenas soluções viáveis, os resultados obtidos são mostrados na Figura 6 para a fronteira de Pareto do problema.

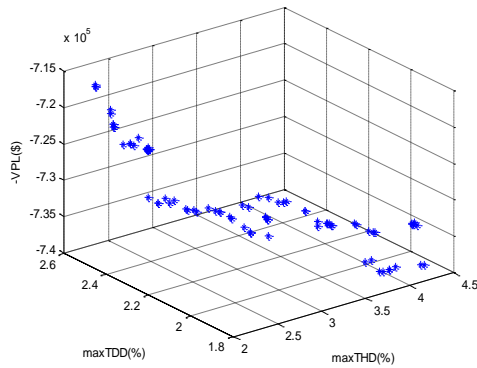


Figura 6. Espaço das soluções viáveis (caso 1).

IV.1 PROJETO DOS FILTROS PARA OS CINCO CENÁRIOS POSSÍVEIS

Neste caso, adicionam-se dois cenários não característicos que complicam o problema, pois os filtros devem ter um desempenho adequado para todos os cenários. Embora aumentem as taxas de distorção da tensão, igual ao caso anterior, não ocorrem violações da norma PRODIST Modulo 8, o que pode ser comprovado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados iniciais (caso 1).

Parâmetro	Valor
Custo anual da energia (\$/ano)	840124
Máximo TDD (%)	7.412
Máximo IDD (%)	6.498
Máximo THD (%)	9.090
Máximo IHD (%)	6.818
Fator de potencia	0.797

A Figura 7 mostra as soluções ordenadas para o novo caso, onde se repete o comportamento observado previamente.

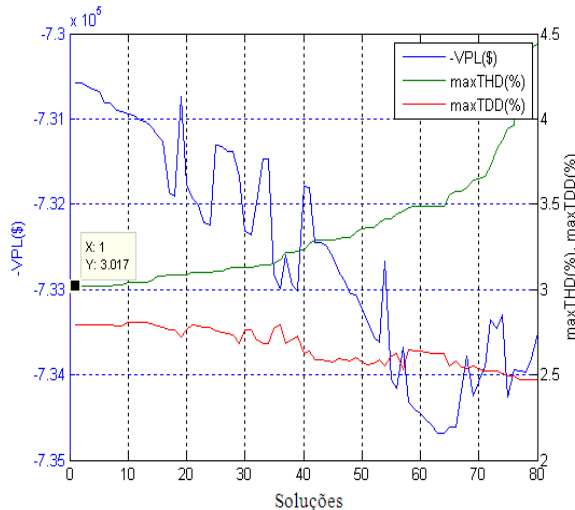


Figura 7. Soluções ordenadas (caso 1).

A solução escolhida apresentada, na Figura 7, está composta pelos filtros cujos parâmetros são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros dos filtros selecionados (caso 2)

Barra	Parâmetro	Ramo 1	Ramo 2
N4	Tipo	2ª ordem	
	Capacitor	8x50 kvar	
	Frequência	5.6	
	Fator de qualidade	5.8	
N8	Tipo	2ª ordem	
	Capacitor	4x50 kvar	
	Frequência	5.5	
	Fator de qualidade	5.8	
N10	Tipo	sintonizado	sintonizado
	Capacitor	4x50 kvar	2x50 kvar
	Frequência	4.7	6.6
	Fator de qualidade	41.3	22.7

Para estes filtros, obtêm-se os resultados da Tabela 11, que demonstram uma redução apreciável dos limites de distorção, e se espera um bom VPL do projeto.

Tabela 11: Resultados finais (caso 1)

Parâmetro	Valor	%
Custo anual da energia (\$/ano)	637442	75.875
Máximo TDD (%)	2.795	37.711
Máximo IDD (%)	2.481	38.177
Máximo THD (%)	3.017	33.191
Máximo IHD (%)	2.594	38.040
Fator de potencia	0.982	123.218
Custo de investimentos dos filtros (\$)	37751	
VPL do projeto	739857	

Como se pode ver, na Figura 5.16, estes filtros têm um desempenho muito estável ante as variações de seus parâmetros L e C.

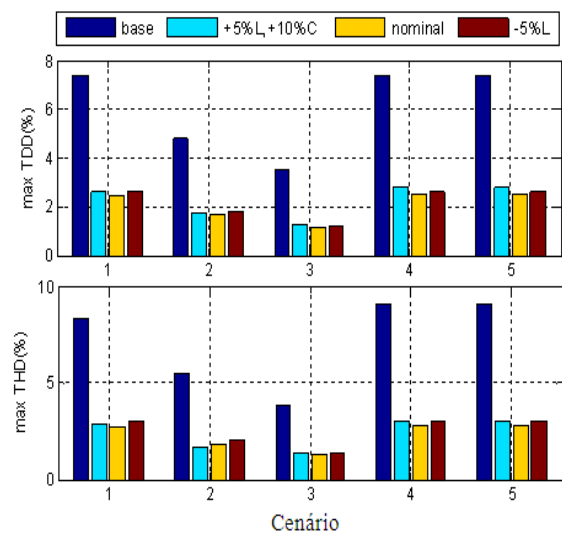


Figura 8. Resultados com depreciação dos filtros (caso 1).

Sendo assim, os resultados da varredura de frequência na Figura 9 mostra que os picos de impedância não coincidem com os harmônicos presentes e, portanto os filtros selecionados podem operar sem problemas.

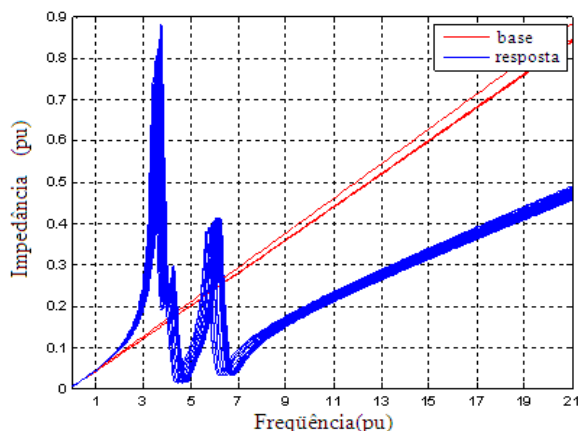


Figura 9. Varredura de freqüência na barra N10.

Como os casos 1 são muitos semelhantes aos outros casos testados, compararam-se os resultados quanto as taxas de distorção TDD e THD das variantes de solução aplicadas no caso 2, esperando que a variante encontrada para este caso seja melhor, sobretudo para dos cenários 4 e 5. Os resultados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12. Comparação entre as soluções 1 e 2 para caso 1.

Índice	Solução	Cenário					Max
		1	2	3	4	5	
maxTDD	1	2.596	1.699	1.234	2.445	4.450	4.450
	2	2.469	1.655	1.139	2.617	2.795	2.795
maxTHD	1	2.346	1.564	1.100	2.369	4.134	4.134
	2	2.742	1.834	1.280	3.017	3.017	3.017

V. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, podem-se tirar as seguintes conclusões. Para a obtenção de bons resultados, é necessário utilizar populações que superem várias vezes o número de variáveis do problema. Os casos considerados com três filtros foram aplicados com populações de 500 elementos (7.6 indivíduos por variável): 1) as respostas obtidas utilizam geralmente capacitores de diferentes potências para os diferentes ramos de um filtro. Isso é diferente das propostas de vários autores, que usam capacitores iguais para os diferentes ramos; 2) devido às características dos algoritmos genéticos, não há garantia de que o tipo de configuração dos filtros escolhida pelo algoritmo seja a melhor. Percebe-se que o algoritmo produzirá um conjunto de boas soluções para o problema. Sendo assim, o programa tem a opção de restringir as possíveis soluções a escolher e prefixar a configuração desejada em cada caso; 3) é necessário melhorar as ferramentas para a seleção da variante final, a partir do conjunto de soluções viáveis, determinadas pelo algoritmo de otimização; 4) as soluções obtidas com o algoritmo devem ser analisadas para diferentes condições de depreciação da capacitância e indutância dos filtros e, desta forma, julgar corretamente o desempenho dos filtros selecionados e 5) o algoritmo de otimização desenvolvido pode se adaptar sensivelmente à programação paralela com o qual se reduziria drasticamente o tempo de execução do algoritmo.

VI. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro a pesquisa.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tostes, Maria Emília de Lima. **Avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição em Consumidores em baixa tensão**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (ITEC-UFPA). 2003.
- [2] Leite, J. C.; Abril, I. P.; Azevedo, M. S. S.; Medeiros, A. B. ; Nascimento, M. H. R. ; Valenzuela, W. A. V. . **Otimização multiobjetivo de filtros harmônicos passivos para instalações industriais usando técnicas de NSGA II**. Revista SODEBRAS, v. 10, p. 110-116, 2015.
- [3] IEEE. Std. 519-92. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. IEEE Industry Applications Society 2014.
- [4] IEC TR 61000-3-6 – “**Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems**”, Edition 2.0, 2008-02.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. V.6. Data de vigência: 01/01/2015.
- [6] Arrillaga, J. and N. R. Watson. **Power Systems Harmonic**. 2nd ed. New York: Wiley, 2003.
- [7] Pereira Costa, Dulce Helena. **Uma Abordagem Evolutiva Multiobjetivo para o Problema de Compensação de Energia Reactiva em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, 2011.
- [8] CLÍMACO, J. N., C.H. ANTUNES E M.J. ALVES, **Programação linear multiobjetivo. Do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de varias funções objetivo**. Universidade de Coimbra, 2003.
- [9] DEB, K., S. AGRAWAL, A. PRATAP, E T. MEYARIVAN, “**A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA- II**”, Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature VI, Springer, 849- 858, 2000.
- [10] BROWNLEE. JASON. **Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes**. Ed.Lulu. ISBN: 9781446785065. 2011.
- [11] SHESHADRI, ARAVIND. **NSGA-II source code available in**. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm/content/NSGA-II/>. Acesso em 23 de outubro de 2012.
- [12] Leite, J. C ; Abril, Ignacio Perez ; Tostes, M. E. L.; Oliveira, R. C. L. **Optimización Multiobjetivos de Filtros Pasivos**. In: Sixth International Conference and Exhibition / Sexta Conferencia y Exhibición Internacional./ IEEE PES T&D LA 2012, 2012, Montevideo. Sixth International Conference and Exhibition/Sexta Conferencia y Exhibición Internacional./ IEEE PES T&D LA 2012. Uruguay: <http://www.ieee-tla.org>, 2012. v. 1. p. 1-30.